

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Kubikel Tegangan Menengah

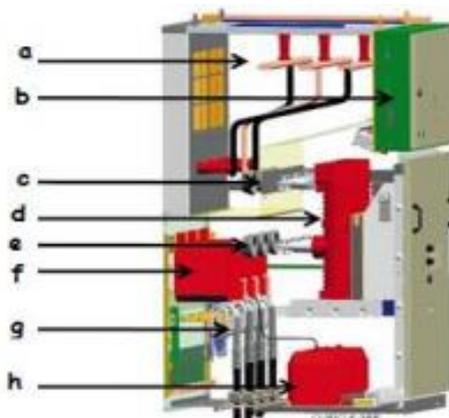
##### 2.1.1 Definisi Kubikel Tegangan Menengah

Kubikel Tegangan Menengah adalah seperangkat panel hubung bagi dengan tegangan kerja 20.000 Volt yang dipasang pada Gardu Induk dan Gardu Distribusi/Gardu Hubung yang berfungsi sebagai pembagi, pemutus, penghubung, pengontrol dan pengaman sistem penyaluran tenaga listrik tegangan menengah.



**Gambar 2.1 Kubikel Tegangan Menengah**

Dibawah ini bagian – bagian dari Kubikel Tegangan Menengah ditunjukkan oleh gambar 2.2



**Gambar 2.2 Peralatan dalam kubikel 20kV**



Keterangan :

- a. Kompartemen Busbar
- b. Kompartemen Lemari Kontrol
- c. Pemisah Rel
- d. Pemutus Tenaga (PMT)
- e. Pemisah Kabel
- f. Kompartemen Kabel
- g. Trafo Arus
- h. Trafo Tegangan

### **2.1.2 Jenis Kubikel**

Berdasarkan fungsi atau penempatan- nya, kubikel 20 kV di Gardu Induk antara lain :

- a. Kubikel Incoming
- b. Kubikel Outgoing
- c. Kubikel Pemakaian Sendiri (Trafo PS)
- d. Kubikel Kopel (bus kopling)
- e. Kubikel PT / LA
- f. Kubikel Bus Riser / Bus Tie (Inter-face)

#### **1. Kubikel Incoming**

Berfungsi sebagai penghubung dari sisi sekunder trafo daya ke rel tegangan menengah.



**Gambar 2.3 Kubikel Incoming di GIS Kotim**



## 2. Kubikel Outgoing

Berfungsi sebagai penghubung / penyalur dari rel ke beban.



**Gambar 2.4 Kubikel Outgoing di GIS Kotim**

## 3. Kubikel Pemakaian Sendiri (Trafo PS)

Berfungsi sebagai penghubung dari rel ke beban pemakaian sendiri GI.



**Gambar 2.5 Kubikel Pemakaian Sendiri di GIS Kotim**

## 4. Kubikel Kopel (Bus Koping)

Berfungsi sebagai penghubung antara rel 1 dengan rel 2.

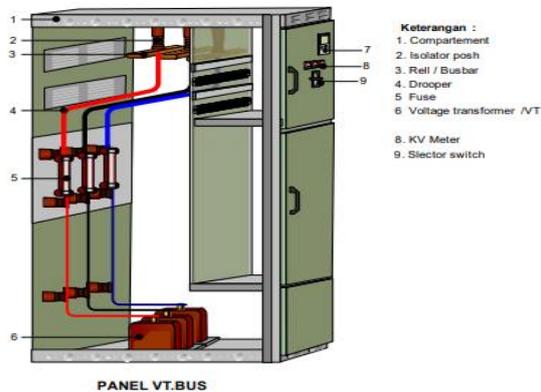


**Gambar 2.6 Kubikel Kopel (Bus Koping) di GIS Kotim**



## 5. Kubikel PT

Berfungsi sebagai sarana pengukuran dan pengaman.



**Gambar 2.7 Kubikel PT di GIS Kotim**

## 6. Kubikel *Bus Riser / Bus Tie (Interface)*

Berfungsi sebagai penghubung antar Kubikel.



**Gambar 2.8 Kubikel *Bus Riser / Bus Tie (Interface)* di GIS Kotim**

### 2.1.3 Komponen – Komponen Kubikel

Kubikel Tegangan Menengah terdiri dari komponen utama dan komponen pendukung. Komponen utamanya, antara lain yaitu:

1. PMT (Pemutus)
2. Rel
3. Trafo Arus (CT)
4. Trafo Tegangan (PT)



Sedangkan komponen pendukung pada Kubikel yaitu:

1. Rele dan Meter
2. Kontrol / Indikator
3. Pemanas (Heater)
4. Handle Kubikel

## 2.2 *Current Transformator (CT)*

### 2.2.1 *Definisi Current Transformator*<sup>1</sup>

Trafo Arus (*Current Transformator - CT*) yaitu peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik disisi primer (TET, TT dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi.

### 2.2.2 *Prinsip kerja Current Transformator*

Bagian utama suatu trafo arus adalah kumparan primer, kumparan sekunder dan inti yang terbuat dari baja silikon, seperti ditunjukkan pada gambar 2.10. Sedang rangkaian ekuivalennya ditunjukkan pada gambar 2.11.

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan  $V_1$  yang sinusoid, akan mengalirlah arus primer  $I_0$  yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan  $N_1$  reaktif murni,  $I_0$  akan tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$ . Arus primer  $I_0$  menimbulkan fluks ( $\Phi$ ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid.

$$\Phi = \Phi_{maks} \sin wt \dots\dots\dots (2.1)$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi  $\varepsilon_1$  (Hukum Faraday)

$$\varepsilon_1 = - N_1 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\varepsilon_1 = - N_1 \frac{d(\Phi_{maks} \sin wt)}{dt} = - N_1 w \Phi_{maks} \cos wt \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\text{Harga efektifny } E_1 = \frac{N_1 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Phi_{maks}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 \cdot f \cdot \Phi_{maks}$$

Pada rangkaian sekunder, fluks ( $\Phi$ ) bersama tadi menimbulkan :

<sup>1</sup> PT. PLN (Persero). 2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Arus*. Jakarta: PT. PLN (Persero). Hal. 1.

$$\varepsilon_2 = - N_2 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\varepsilon_2 = - N_2 w \Phi_{maks} \cos wt \dots\dots\dots (2.5)$$

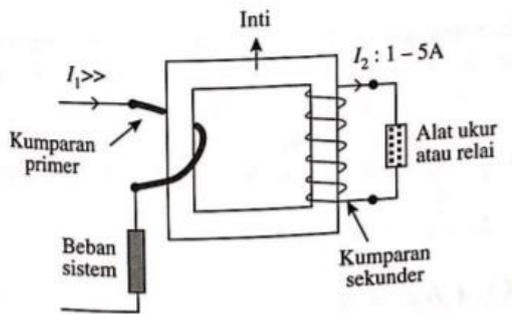
$$E_2 = 4,44 N_2 . f . \Phi_{maks} , \text{ sehingga } \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor,

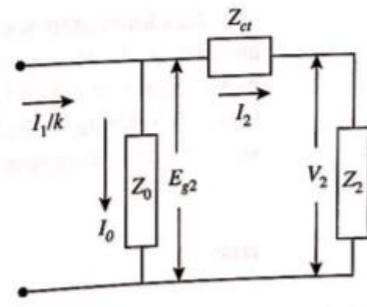
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = a \dots\dots\dots (2.6)$$

$a$  = perbandingan transformasi<sup>2</sup>

Kumparan primer trafo arus dihubungkan seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur arusnya, sehingga arus pada kumparan primer ( $I_1$ ) sama besarnya dengan arus pada jaringan. Arus  $I_1$  membangkitkan gaya gerak magnet ( $ggm$ ) pada kumparan primer sebesar  $N_1 I_1$ . Ggm ini memproduksi fluks pada inti. Selanjutnya, fluks ini membangkitkan gaya gerak listrik pada kumparan sekunder ( $E_2$ ). Jika terminal kumparan sekunder tertutup oleh meter atau relai proteksi, maka kumparan sekunder mengalir arus  $I_2$ . Arus ini membangkitkan ggm pada kumparan sekunder sebesar  $N_2 I_2$ .<sup>3</sup>

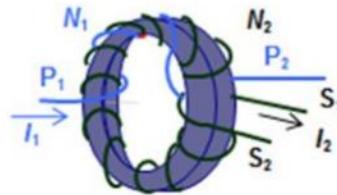


Gambar 2.9 Bagian utama trafo arus



Gambar 2.10 Rangkaian ekuivalen dilihat dari sisi primer

<sup>2</sup> Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. Bandung : Penerbit ITB. Hal. 17.  
<sup>3</sup> Tobing, Bonggas L. 2019. Peralatan Tegangan Tinggi Edisi Ketiga. Jakarta : Penerbit Erlangga. Hal. 111.



**Gambar 2.11 Rangkaian pada CT**

Bila pada trafo arus tidak ada rugi – rugi daya (trafo ideal), maka berlaku persamaan:

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2 \dots\dots\dots (2.7)$$

Atau

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = k_n \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana,

$k_n$  = rasio transformasi arus pengenal

$N_1$  = jumlah belitan kumparan primer

$N_2$  = jumlah belitan kumparan sekunder

Dalam praktiknya,  $N_1$  dan  $N_2$  tidak diketahui, yang diketahui adalah arus pengenal primer dan arus pengenal sekunder, sehingga rasio arus pengenal ditetapkan dengan pendekatan sebagai perbandingan arus pengenal primer dengan arus pengenal sekunder trafo arus, atau

$$k_n = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana,

$I_{1n}$  = arus pengenal kumparan primer (A)

$I_{2n}$  = arus pengenal kumparan sekunder (A)

### 2.2.3 Fungsi Current Transformer

Beberapa fungsi dari *Current Transformer* adalah sebagai berikut :

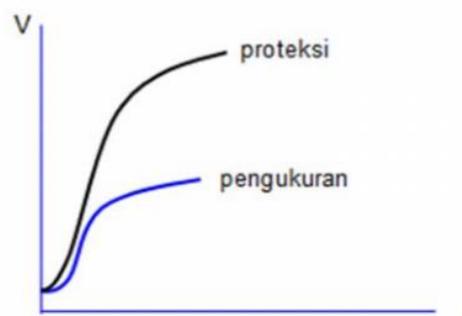
- Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi
- Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 Amp dan 5 Amp



- Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.

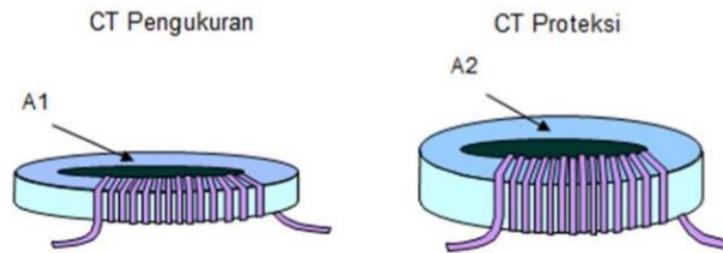
Secara fungsi *Current Transformator* dibedakan menjadi dua yaitu :

- a. Trafo arus pengukuran
  - Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi.
  - Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan  $\cos \phi$  meter.
- b. Trafo arus proteksi
  - Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi.
  - Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak.
  - Perbedaan mendasar trafo arus pengukuran dan proteksi adalah pada titik saturasinya seperti pada kurva saturasi dibawah ini



**Gambar 2.12 Kurva kejenuhan CT untuk Pengukuran dan Proteksi**

Trafo arus untuk pengukuran dirancang supaya lebih cepat jenuh dibandingkan trafo arus proteksi sehingga konstruksinya mempunyai luas penampang inti yang lebih kecil.



**Gambar 2.13** Luas penampang Inti Trafo Arus

#### 2.2.4 Jenis *Current Transformer*

a. Jenis trafo arus menurut tipe konstruksi dan pasangannya

1. Tipe Konstruksi

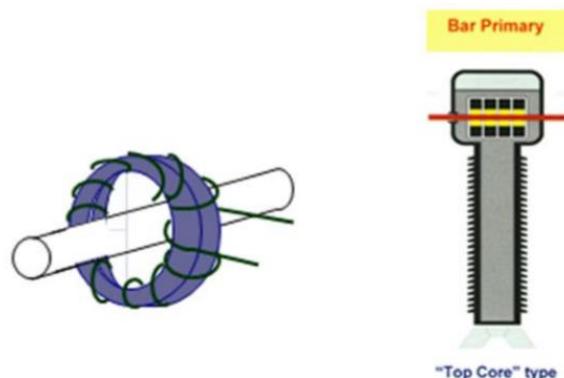
- Tipe cincin (*ring/window type*)
- Tipe cor-coran cast resin (*mounded cast resin type*)
- Tipe tangki minyak (*oil tank type*)
- Tipe trafo arus bushing

2. Tipe Pasangan.

- Pasangan dalam (*indoor*)
- Pasangan luar (*outdoor*)

b. Jenis trafo arus berdasarkan konstruksi belitan primer:

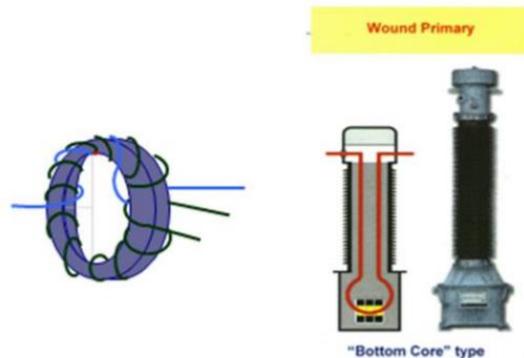
1. Sisi primer batang (*bar primary*)



**Gambar 2.14** *Bar Primary*



## 2. Sisi tipe lilitan (wound primary)



**Gambar 2.15 Wound Primary**

### c. Jenis trafo arus berdasarkan konstruksi jenis inti

#### ➤ Trafo arus dengan inti besi

Trafo arus dengan inti besi adalah trafo arus yang umum digunakan pada arus yang kecil (jauh dibawah nilai nominal) terdapat kecenderungan kesalahan dan pada arus yang besar (beberapa kali nilai nominal) trafo arus akan mengalami saturasi.

#### ➤ Trafo arus tanpa inti besi

Trafo arus tanpa inti besi tidak memiliki saturasi dan rugi histerisis, transformasi dari besaran primer ke besaran sekunder adalah linier di seluruh jangkauan pengukuran, contohnya adalah koil rogowski (coil rogowski).

### d. Jenis trafo arus berdasarkan jenis isolasi

Berdasarkan jenis isolasinya, trafo arus terdiri dari:

#### ➤ Trafo arus isolasi minyak

Trafo arus isolasi minyak banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (outdoor) misalkan trafo arus tipe bushing yang digunakan pada pengukuran arus penghantar tegangan 70 Kv dan 150 kV.

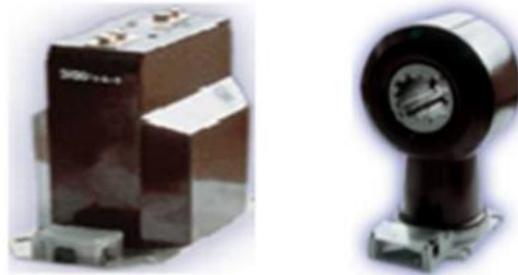


- Trafo arus kering  
Trafo arus kering biasanya digunakan pada tegangan rendah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (indoor).
  - Trafo arus isolasi SF6/compound  
Trafo arus ini banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (outdoor) misalkan trafo arus tipe top-core.
  - Trafo arus cast resin  
Trafo arus ini biasanya digunakan pada tegangan menengah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (indoor), misalnya trafo arus tipe cincin yang digunakan pada kubikel penyulang 20 kV.
- e. Jenis trafo arus berdasarkan pemasangan
- Trafo arus dibagi menjadi dua kelompok menurut lokasi pemasangannya yaitu:
- Trafo arus pemasangan luar ruangan (outdoor)  
Pada trafo arus pemasangan luar ruangan memiliki konstruksi fisik yang kokoh, isolasi yang baik, biasanya menggunakan bahan keramik/porcelain untuk isolator eksternal dan isolasi minyak untuk rangkaian elektrik internal.



**Gambar 2.16 Trafo Arus Pemasangan Outdoor**

- Trafo arus pemasangan dalam ruangan (indoor)  
Pada trafo arus pemasangan dalam ruangan biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil dari pada trafo arus pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin.



**Gambar 2.17 Trafo Arus Pemasangan Indoor**

f. Jenis Trafo arus berdasarkan jumlah inti pada sekunder

- Trafo arus dengan inti tunggal

Contoh: 150 – 300 / 5 A, 200 – 400 / 5 A, atau 300 – 600 / 1 A

- Trafo arus dengan inti banyak

Trafo arus dengan inti banyak digunakan untuk menghemat tempat dan dirancang untuk berbagai keperluan yang mempunyai sifat penggunaan yang berbeda.

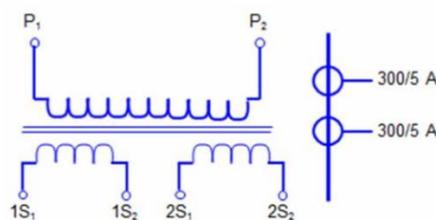
Contoh:

- Trafo arus dua inti 150 – 300 / 5 – 5 A.

Penandaan primer: P1-P2

Penandaan sekunder inti ke-1: 1S1-1S2 (untuk pengukuran)

Penandaan sekunder inti ke-2: 2S1-2S2 (untuk relai arus lebih)



**Gambar 2.18 Trafo Arus dengan 2 Inti**

- Trafo arus empat inti 800 – 1600 / 5 – 5 – 5 – 5 A.

Penandaan primer: P1 - P2

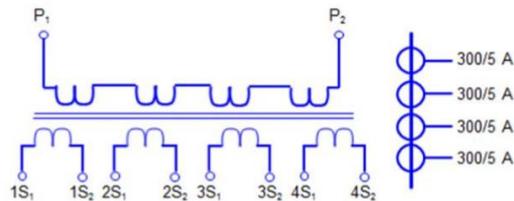
Penandaan sekunder inti ke-1: 1S1-1S2 (untuk pengukuran)

Penandaan sekunder inti ke-2: 2S1-2S2 (untuk relai arus lebih)



Penandaan sekunder inti ke-3: 3S1-3S2 (untuk relai jarak)

Penandaan sekunder inti ke-4: 4S1-4S2 (untuk proteksi rel)



**Gambar 2.19 Trafo Arus dengan 4 Inti**

g. Jenis trafo arus berdasarkan pengenal

Trafo arus memiliki dua pengenal, yaitu pengenal primer dan sekunder.

Pengenal primer yang biasanya dipakai adalah 150, 200, 300, 400, 600, 800, 900, 1000, 1200, 1600, 1800, 2000, 2500, 3000 dan 3600.

Pengenal sekunder yang biasa dipakai adalah 1 dan 5 A.

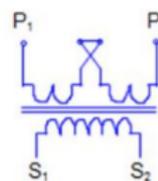
Berdasarkan pengenalnya, trafo arus dapat dibagi menjadi:

➤ Trafo arus dengan dua pengenal primer

- Primer seri

Contoh: CT 800 – 1600 / 1 A

Untuk hubungan primer seri, maka didapat rasio CT 800 / 1 A.

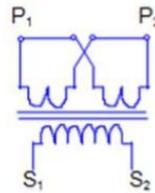


**Gambar 2.20 Primer Seri CT rasio 800 / 1 A**

- Primer paralel

Contoh: CT dengan rasio 800 – 1600 / 1 A

Untuk hubungan primer paralel, maka didapat rasio CT 1600 A.



**Gambar 2.21 Primer Paralel CT rasio 1600 / 1 A**

➤ Trafo arus multi rasio/sekunder tap

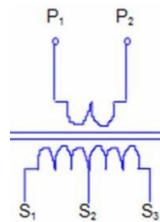
Trafo arus multi rasio memiliki rasio tap yang merupakan kelipatan dari tap yang terkecil, umumnya trafo arus memiliki dua rasio tap, namun ada juga yang memiliki lebih dari dua tap.

Contoh:

- Trafo arus dengan dua tap: 300 – 600 / 5 A

$$S1-S2 = 300 / 5 \text{ A}$$

$$S1-S3 = 600 / 5 \text{ A}$$



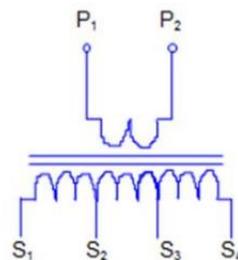
**Gambar 2.22 CT Sekunder 2 Tap**

- Trafo arus dengan tiga tap: 150 – 300 – 600 / 5 A

$$S1-S2 = 150 / 5 \text{ A}$$

$$S1-S3 = 300 / 5 \text{ A}$$

$$S1-S4 = 600 / 5 \text{ A.}$$



**Gambar 2.23 CT Sekunder 3 Tap**



### 2.2.5 Spesifikasi Trafo Arus<sup>4</sup>

Spesifikasi trafo arus menurut IEC adalah sebagai berikut :

a. Arus Pengenal Primer

Adalah batas tertinggi arus kontinyu pada belitan primer trafo arus. Arus pengenal primer antara lain adalah : 10, 15, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 5000, 7500 dan 10.000 A. Arus pengenal primer dipilih 10-40% lebih tinggi daripada perkiraan arus yang akan diukur.

b. Arus Pengenal Sekunder

Adalah batas tertinggi arus kontinyu pada belitan sekunder trafo arus, biasanya: 5, 2 dan 1 A. Arus pengenal 2 dan 1 A digunakan: jika kabel penghubung Panjang sehingga jumlah impedansi meter atau relai dengan impedansi kabel lebih besar daripada impedansi burden; dan jika jumlah belitan kumparan sekunder sedikit sehingga rasio tidak dapat diubah dengan mengubah jumlah belitan sekundernya.

c. Rasio Pengenal

Adalah perbandingan arus pengenal primer dengan arus pengenal sekunder.

d. Frekuensi Pengenal

Frekuensi pengenal sama dengan frekuensi sistem, 50 Hz atau 60 Hz.

e. Galat (*Error*)

Ada tiga jenis galat trafo arus, yaitu galat rasio, galat sudut dan galat komposit.

f. Arus Eksitasi

Adalah harga efektif arus sekunder bila terminal sekunder diberi tegangan sinusoidal frekuensi pengenal, sedangkan terminal primer terbuka.

---

<sup>4</sup> Tobing, Bonggas L. 2019. *Peralatan Tegangan Tinggi Edisi Ketiga*. Jakarta : Penerbit Erlangga. Hal. 131.



g. Arus termal kontinu

Adalah arus kontinu tertinggi yang menimbulkan temperatur trafo arus sama dengan temperature yang diijinkan. Jika nilai pengenal arus termal kontinu tidak diberikan, nilainya dapat ditetapkan sama dengan arus pengenal primer. Ada kalanya diberi faktor pengali untuk menyatakan kemampuannya memikul arus termal kontinu di atas pengenalnya, misalnya 1,2 kali arus pengenal. Ketelitian harus tetap (tidak boleh berubah) Ketika arus kontinu di atas arus pengenal.

h. Arus termal waktu singkat

Adalah arus tertinggi yang dapat mengalir pada belitan primer selama satu sekon tanpa menimbulkan kerusakan pada komponen trafo arus, maupun menimbulkan perubahan karakteristik trafo arus. Nilainya ditentukan dengan menghitung arus hubung singkat terbesar yang melewati kumparan primer trafo arus. Nilai standar arus termal waktu singkat (rms) adalah : 6,3; 8; 10; 2,5; 16; 20; 25; 31; 5; 40; 50; 63; 80; dan 100 kA.

i. Arus dinamis waktu singkat

Arus dinamis waktu singkat ditentukan dengan menghitung arus hubung singkat terbesar yang melewati kumparan primer trafo arus. Untuk frekuensi sistem 50 Hz, arus dinamis waktu singkat sama dengan 2,5 kali arus termal waktu singkat; sedangkan untuk frekuensi sistem 60 Hz, arus dinamis waktu singkat sama dengan 2,6 kali arus termal waktu singkat.

j. Arus keamanan instrument (*Rated Instrument Security Current*)

Adalah arus primer efektif terendah ( $I_{1s}$ ) yang menimbulkan arus sekunder ( $I_{2s}$ ) dikalikan dengan rasio transformasi ( $k_n$ ), nilainya tidak melebihi 0,9 arus primer; dan burden Ketika itu sama dengan burden pengenal trafo arus. Pernyataan ini dapat dituliskan dengan persamaan berikut ini :



$$k_n I_{2s} < 0,9 I_{1s} \dots\dots\dots (2.10)$$

k. Faktor keselamatan instrument (*Instrument Security Factor*)

Adalah perbandingan arus keamanan trafo arus dengan arus pengenal primer ( $I_{1n}$ ) atau dapat dituliskan :

$$FS = \frac{I_{1s}}{I_{1n}} \dots\dots\dots (2.11)$$

l. Ketelitian

Ketelitian trafo arus bergantung kepada fungsinya. Ketelitian trafo arus untuk keperluan pengukuran lebih tinggi daripada ketelitian trafo arus untuk keperluan proteksi.

m. Jumlah kumparan primer dan sekunder

Jumlah kumparan primer dan sekunder bergantung kepada banyak rasio yang dibutuhkan dan jenis beban yang akan dipasang pada terminal sekunder trafo arus. Umumnya trafo arus dilengkapi dengan dua kumparan sekunder, satu untuk alat ukur dan satu lagi untuk keperluan relai proteksi.

n. Batas ggl sekunder

Batas ggl sekunder ( $E_{g2maks}$ ) adalah perkalian faktor keamanan ( $F_s$ ), arus pengenal sekunder ( $I_{2n}$ ) dan jumlah vektoris impedansi burden pengenal dan impedansi beban pada terminal kumparan sekunder trafo arus ( $Z_{ct} + R_{relai} + R_{kabel\ ukur}$ ). Resistansi kabel dihitung pada temperature  $75^\circ C$ .

o. Tegangan lutut

Tegangan lutut diperhitungkan bila trafo arus dipergunakan untuk relai proteksi. Tegangan lutut pengenal sama atau lebih rendah daripada tegangan lutut aktual.

p. Jenis trafo arus

Jika digunakan bersama pemutus daya minyak (*bulk oil circuit breaker*), maka trafo arus jenis bushing adalah lebih murah. Untuk jenis pemutus daya yang lain digunakan trafo arus jenis tonggak



(*post*). Ada kalanya trafo arus jenis tonggak dengan belitan terpisah digunakan bersama dengan pemutus daya minyak. Hal ini dilakukan karena keterbatasan burden dan ketelitian trafo arus jenis bushing. Jika arus pengenal sekunder dirancang 5 A, kabel ukur yang digunakan cukup Panjang dan trafo arus yang akan digunakan adalah jenis busing, maka harus diperiksa apakah burden total dapat dipikul oleh trafo tersebut.

q. Jumlah Inti

Jumlah inti bergantung kepada jenis beban (meter dan relai) yang akan dilayani trafo arus. Jika sistem proteksi terdiri dari proteksi primer dan proteksi cadangan, maka dibutuhkan trafo arus dengan inti terpisah.

r. Kondisi lingkungan instalasi trafo arus

Ada tiga hal yang perlu dipertimbangkan, yaitu: bobot polusi dan temperature rata – rata serta ketinggian lokasi instalasi trafo arus di atas permukaan laut.

s. Batas Ketelitian Arus Primer (Accuracy Limit Primary Current)<sup>5</sup>

Batas ketelitian arus primer adalah batasan kesalahan arus primer minimum dimana kesalahan komposit dari trafo arus sama atau lebih kecil dari 5% atau 10% pada saat sekunder dibebani arus pengenalnya.

t. Faktor Batas Ketelitian (Accuracy Limit Factor/ALF)

Faktor batas ketelitian disebut juga faktor kejenuhan inti adalah batasan perbandingan nilai arus primer minimum terhadap arus primer pengenal dimana kesalahan komposit dari trafo arus sama atau lebih kecil dari 5% atau 10% pada saat sekunder yang dibebani arus pengenalnya.

$$ALF = \frac{I_{primer}}{I_{rated}} \dots\dots\dots(2.12)$$

<sup>5</sup> PT. PLN (Persero). 2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Arus*. Jakarta : PT. PLN (Persero). Hal. 15.



u. Pengenal Beban (Rated Burden)

Pengenal beban adalah pengenal dari beban trafo arus dimana akurasi trafo arus masih bisa dicapai dan dinyatakan dalam satuan VA. Umumnya bernilai 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30 dan 40 VA.

v. Pengenal Arus Sesaat (Instantaneous Rated Current)

Pengenal arus sesaat atau sering disebut short time rated current adalah arus primer maksimum (dinyatakan dalam nilai rms) yang diperbolehkan mengalir dalam waktu tertentu dengan sekunder trafo arus terhubung singkat sesuai dengan tanda pengenal trafo arus (nameplate), contoh:  $I_{th} = 25 \text{ kA/1 s}$ .

w. Pengenal Arus Dinamik (Dynamic Rated Current)

Pengenal arus dinamik adalah perbandingan  $\frac{I_{peak}}{I_{rated}}$ , dimana  $I_{peak}$  adalah arus puncak primer maksimum trafo arus yang diijinkan tanpa menimbulkan kerusakan dan  $I_{rated}$  adalah arus nominal primer trafo arus, contoh:  $I_{dyn} = 40 \text{ kA}$ .

x. Pengenal Arus Kontinyu (Continuous Rated Current)

Pengenal arus kontinyu adalah arus primer maksimum yang diperbolehkan mengalir secara terus-menerus (arus nominal). Umumnya dinyatakan pada pengenal trafo arus, contoh: 300/5 A.

### 2.2.6 Kesalahan Trafo Arus

a. Kesalahan Perbandingan/Rasio

Kesalahan perbandingan/rasio trafo arus berdasarkan IEC–60044-1 Edisi 1.2 tahun 2003 adalah kesalahan besaran arus karena perbedaan rasio pengenal trafo arus dengan rasio sebenarnya dinyatakan dalam:

$$e = \frac{K_n \cdot I_s - I_p}{I_p} \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana,  $e$  = Kesalahan rasio trafo arus (%)

$K_n$  = Pengenal rasio trafo arus



$I_p$  = Arus primer aktual trafo arus (A)

$I_s$  = Arus sekunder aktual trafo arus (A)

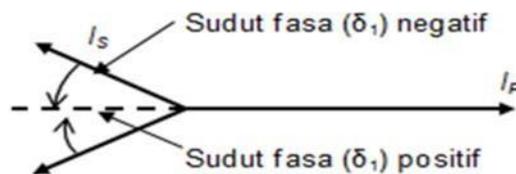
Karena adanya perbedaan antara arus yang masuk di sisi primer dengan arus yang terbaca di sisi sekunder, dapat menimbulkan perbedaan ratio transformasi arus yang sebenarnya dengan kenyataannya.

b. Kesalahan sudut fasa

Kesalahan sudut fasa adalah kesalahan akibat pergeseran fasa antara arus sisi primer dengan arus sisi sekunder. Kesalahan sudut fasa akan memberikan pengaruh pada pengukuran berhubungan dengan besaran arus dan tegangan, misalnya pada pengukuran daya aktif maupun daya reaktif, pengukuran energi dan relai arah. Pemeriksaan ini umumnya dilakukan pada saat komisioning atau saat investigasi. Batasan maksimum nilai kesalahan sudut fasa berdasarkan persentase pembebanan dan kelas CT metering dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2, sedangkan untuk kelas CT proteksi dapat dilihat pada Tabel 3.

Kesalahan sudut fasa dibagi menjadi dua nilai, yaitu:

- Bernilai positif (+) jika sudut fasa  $I_s$  mendahului  $I_p$
- Bernilai negatif (-) jika sudut fasa  $I_s$  tertinggal  $I_p$



**Gambar 2.24 Kesalahan sudut fasa**



### 2.2.7 Kelas Ketelitian Trafo Arus Metering

Trafo arus metering memiliki ketelitian tinggi untuk daerah pengukuran sampai 1,2 kali nominalnya. Daerah kerja trafo arus metering antara:  $0.1 - 1.2 \times I_N$  trafo arus.

Kelas ketelitian trafo arus metering dinyatakan dalam prosentase kesalahan rasio pengukuran baik untuk arus maupun pergeseran sudut fasa, seperti pada di bawah ini.

**Tabel 2.1 Batas Kesalahan Trafo Arus Metering**

Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan Rasio Arus pada % dari Arus Pengenal				+/- % Pergeseran Fase pada % dari Arus Pengenal Menit (1/60 derajat)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1,0	3,0	1,5	0,1	0,1	180	90	60	60

**Tabel 2.2 Batas Kesalahan Trafo Arus Metering**

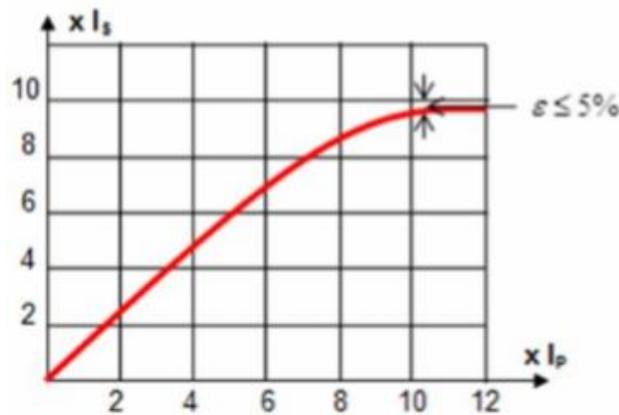
Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan Rasio Arus pada % dari Arus Pengenal				+/- % Pergeseran Fase pada % dari Arus Pengenal Menit (1/60 derajat)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30

Contoh pembacaan kedua tabel di atas adalah sebagai berikut:

Trafo arus dengan spesifikasi sebagai berikut; ratio 300/5 A, klas 0,2 dan dibebani sebesar 60 Amp (20%  $I_N$ ), maka kesalahan maksimum ratio arus yang diijinkan



adalah  $\pm 0,35\%$  dan pergeseran maksimum fasa sebesar  $\pm 15/60$  derajat atau 0,25 derajat.



**Gambar 2.25 Kurva Faktor Batas Ketelitian**

### 2.2.8 Kelas Ketelitian Trafo Arus Proteksi

#### a. Kelas P

CT yang mempunyai batas ketelitian berdasarkan kesalahan komposit yang ditentukan dalam keadaan steady state arus primer simetris. Kelas ketelitian trafo arus proteksi dinyatakan dalam pengenal sebagai berikut: 15 VA, 10P20.

15 VA = Pengenal beban (burden) trafo arus, sebesar 15 VA

10 P = Kelas proteksi, kesalahan komposit 10% pada pengenal batas akurasi

20 = Accuracy Limit Factor, batas ketelitian trafo arus s.d. 20 kali arus pengenal

**Tabel 2.3 Kesalahan Rasio dan Pergeseran Fasa Trafo Arus Proteksi**

Kelas Ketelitian	Pada Arus Pengenal		Kesalahan Komposit pada batas ketelitian Arus Primer Pengenal (%)
	Kesalahan Rasio (%)	Kesalahan Sudut (menit)	
5P	$\pm 1$	$\pm 60$	5
10P	$\pm 3$	-	10



b. Kelas PX, PR, TPS, TPX, TPY dan TPZ

Trafo arus yang mempunyai sirkit tanpa ataupun dengan celah udara serta mempunyai tipikal konstanta waktu sekunder, dikelompokkan sebagai berikut:

1. Kelas PX

Trafo arus yang harus memiliki kebocoran reaktansi rendah dan informasi khusus seperti ratio, tegangan knee point, arus eksitasi maksimum dan secondary circuit resistance ( $R_{ct}$ ).

2. Kelas PR

Trafo arus yang sama dengan kelas P tetapi mempunyai remanensi rendah.

3. Kelas TPS

Trafo arus yang mempunyai kebocoran fluksi rendah dimana unjuk kerjanya ditentukan oleh kurva magnetisasi ( $V$  knee), arus magnetisasi, serta tahanan belitan sekunder. Tidak ada batasan untuk remanensi fluksi. Trafo arus TPS adalah trafo arus tanpa celah udara sehingga kebocoran fluksi yang kecil. Tipe ini juga bersesuaian dengan Trafo Arus kelas X menurut British Standart 3938 tahun 1973 yang direkomendasikan untuk relai Differential.

4. Kelas TPX (non gapped core)

Trafo arus yang mempunyai batas ketelitian berdasarkan kesalahan komposit yang ditentukan selama siklus kerja transien dan tidak ada batasan untuk remanensi fluksi. Trafo arus TPX adalah trafo arus tanpa celah udara dengan konstanta waktu lebih lama dari 5 detik, umumnya 5 s.d. 20 detik. Trafo arus jenis ini mempunyai ketelitian tinggi, arus magnetisasi yang sangat rendah, presisi pada transformasi komponen AC dan DC.

- Cocok untuk semua jenis proteksi
- Faktor remanensi  $KR \approx 0.8$



- Trafo arus jenis ini mempunyai inti yang besar sehingga berat dan mahal
- Dapat dikombinasikan dengan trafo arus jenis TPY
- Pengguna (user) harus menyertakan nilai minimum dari  $V_{knee}$  dan nilai rms maksimum dari arus eksitasi
- Trafo arus jenis TPX ini pada umumnya digunakan pada sistem tegangan tinggi/tegangan ekstra tinggi untuk proteksi: Busbar, CCP, dan REF

#### 5. Kelas TPY (anti remanence gapped core)

Trafo arus yang memiliki batas ketelitian berdasarkan kesalahan nilai maksimum sesaat selama siklus kerja transien. Remanensi fluksi tidak melebihi 10% dari nilai kejenuhan (saturasi). Trafo arus TPY adalah trafo arus yang memiliki celah udara kecil (pada inti) dengan konstanta waktu 0.2 s.d. 5 detik. Trafo arus jenis ini hampir sama dengan trafo arus jenis TPX namun transformasi komponen DC tidak seteliti trafo arus TPX.

- Kesalahan transien lebih besar pada konstanta waktu yang kecil
- Faktor remanensi  $KR < 0.1$
- Trafo arus jenis ini mempunyai inti yang besar sehingga berat dan mahal
- Cocok untuk semua jenis proteksi
- Toleransi konstanta waktu sekunder  $\pm 20\%$  jika  $T_s < 2$  detik dan CT digunakan untuk proteksi penghantar (LP) tegangan ekstra tinggi

#### 6. Kelas TPZ (linear core)

Trafo arus yang memiliki batas ketelitian yang ditentukan berdasarkan kesalahan nilai maksimum sesaat komponen bolak balik selama energisasi yang tunggal dengan nilai dc offset yang maksimum pada konstanta waktu rangkaian sekunder tertutup.



Trafo arus TPZ adalah trafo arus yang memiliki celah udara besar (pada inti) dengan konstanta waktu 60 milidetik  $\pm 10\%$ .

Arus magnetisasi 53% dari arus sekunder pada keadaan tunak (steady state).

- Faktor remanensi  $KR \approx 0$
- Ukuran core 1/3 dari tipe TPX dan TPY untuk keperluan yang sama,
- Hanya dapat dikombinasikan dengan trafo arus jenis TPZ saja.

### 2.2.9 Eksitasi (*knee point*)

Eksitasi adalah titik saturasi atau titik jenuh saat transformator arus melakukan eksitasi tegangan. Transformator arus memiliki kurva magnetisasi yang unik, dimana kurva tersebut dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu *unsaturated zone*, *intermediate zone*, dan *saturated zone*. Nilai kejenuhan inti dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$V_S = IF \cdot rasio (R_{ref} + R_{meas}) \dots \dots \dots (2.14)$$

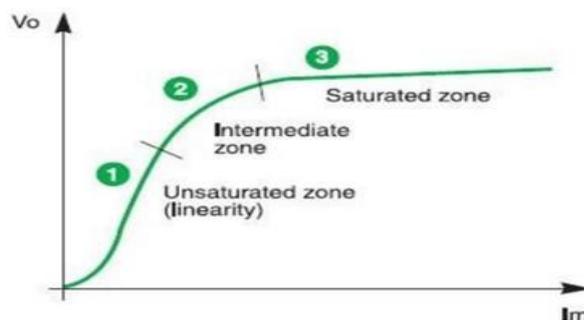
Dimana :

$V_S$  = Kejenuhan inti pada sisi sekunder CT (V)

$IF$  = Arus maksimum (A)

$R_{ref}$  = Tahanan referensi (Ohm)

$R_{meas}$  = Tahanan terukur (Ohm)



Gambar 2.26 Kurva Eksitasi *Current Transformer*

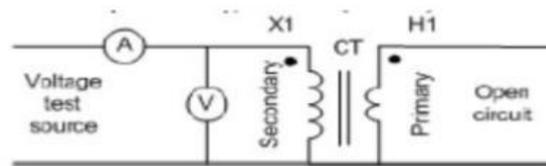


### 2.3 Shutdown Testing/Masurement

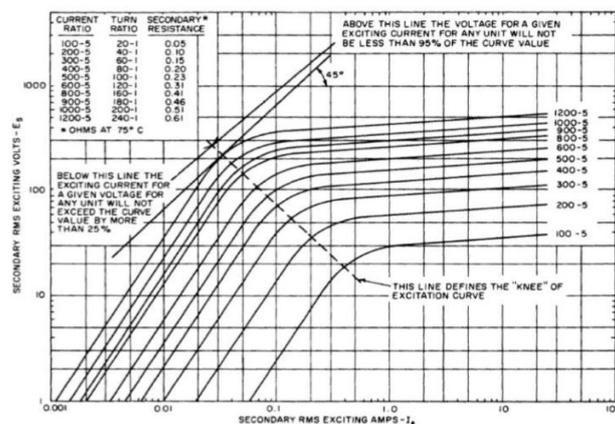
*Shutdown testing/measurement* adalah pekerjaan pengujian yang dilakukan pada saat peralatan dalam keadaan padam. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidaknormalan.

#### a. Pengujian Eksitasi atau $V_{knee}$

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik eksitasi dari trafo arus. Karakteristik eksitasi adalah suatu grafik yang menggambarkan hubungan antara arus eksitasi dan tegangan rms yang diterapkan pada sisi sekunder CT dalam kondisi sisi primer open circuit. Dalam kurva karakteristik eksitasi dapat diketahui tegangan knee dari suatu CT maka dapat dipastikan bahwa CT tidak mengalami kejenuhan saat arus primer sama dengan arus hubung singkat tertinggi.



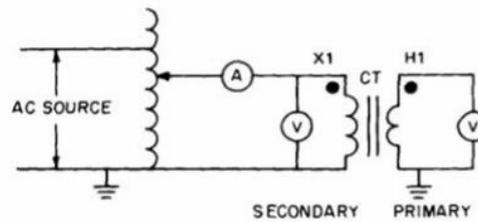
**Gambar 2.27 Rangkaian Pengujian Eksitasi**



**Gambar 2.28 Karakteristik Eksitasi**

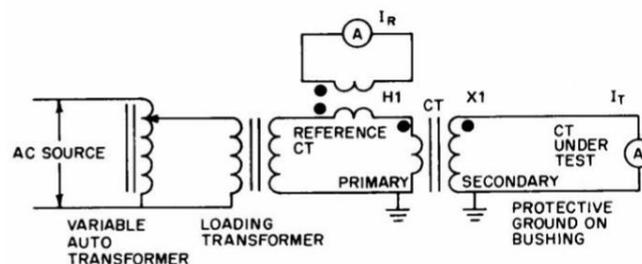
#### b. Ratio

Pengukuran ratio bertujuan untuk membandingkan nilai ratio hasil pengukuran dengan nilai pada nameplate.



**Gambar 2.29 Pengujian Ratio dengan Metode Tegangan**

Pada sisi sekunder diinjeksikan tegangan yang sesuai, dibawah tegangan saturasi (knee voltage) dan pada sisi primer diukur tegangan menggunakan voltmeter skala rendah dengan impedansi tinggi ( $20\,000\ \Omega/V$  atau lebih). Ratio belitan mendekati sama dengan ratio tegangan yaitu membandingkan tegangan di sisi primer dengan tegangan disisi sekunder.



**Gambar 2.30 Pengujian Ratio dengan Metode Arus**

Pengujian ini menggunakan alat uji injeksi arus (high current test injection), dilakukan dengan mengatur catu daya pada alat uji sesuai dengan nilai yang diinginkan serta mencatat arus pada sisi sekunder kedua CT. rasio dari CT adalah sama dengan rasio dari CT referensi yang dikalikan rasio antara arus sisi sekunder CT referensi dengan arus sisi sekunder CT yang diuji.